

УДК 621.396.96

РЕАЛИЗАЦИЯ ВЫСОКОТОЧНОЙ СПУТНИКОВОЙ ШИРОКОЗОННОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ

С.Н. Флерко

(представил д.т.н., проф. А.И. Погорелов)

В работе обсуждается возможность применения геометрического подхода при реализации широкозонной дифференциальной навигации по сигналам космических навигационных систем.

Дифференциальные методы навигации по сигналам космических навигационных систем (КНС) NAVSTAR и ГЛОНАСС применяются в целях повышения точности и надежности навигационных определений (НО). В связи с постоянно возрастающими требованиями потребителей, развитию средств и систем, обеспечивающих дифференциальный режим измерений, уделяется особое внимание во всех развитых странах мира, активно обсуждаются способы построения псевдоспутников, отдельных контрольных станций (КС) и их объединений в сети. Как показывает анализ [1], традиционному подходу (применение отдельных локальных КС) присущ ряд недостатков, связанных с ограниченной областью действия КС. В этой связи значительный интерес вызывает организация дифференциальной навигации по широкозонным принципам, когда за счет малого числа КС удается обеспечить высокоточной корректирующей информацией потребителей в обширных регионах.

Наиболее эффективным представляется способ реализации широкозонной дифференциальной навигации (ШДН), основанный на разделении сетью КС значимых медленноменяющихся погрешностей измерений: эфемеридных, частотно - временных и атмосферных составляющих [2]. Реализация ШДН с разделением источников погрешностей возможна динамическим методом (с использованием моделей движения НКА) [2] и геометрическим методом.

Целью настоящей статьи является исследование возможности применения геометрического метода определения корректирующей информации ШДН.

Основу процесса обработки измерений сети КС целесообразно базиро-

© С.Н. Флерко, 1998

вать на комплексном использовании кодовых и фазовых измерений. В этом случае измерения осуществляются на двух несущих частотах (**L1** и **L2**) КНС кодовыми либо бескодовыми методами для компенсации ионосферных погрешностей измерений. Для уточнения параметров модели тропосферы необходимо оснащение КС дополнительными средствами, в частности, радиометрами водяных паров и высокоточными датчиками температуры, давления и влажности [1].

С учетом компенсации воздействия атмосферных эффектов, фильтрации шумовых составляющих и разрешения неоднозначности фазовых измерений, система уравнений, описывающих измерения ШДН, имеет вид:

$$\begin{cases} \Delta S_{i1\text{TM}}^j(t) = R_i^j(t) - R_1^j(t) + \nabla_{i1}(t) + \delta \Delta S_{i1\text{TM}}^j(t); \\ S_{i1\text{h}}^j(t) = R_1^j(t) + \alpha^j(t) + \delta S_{i1\text{h}}^j(t); \\ S_{i1\text{h}}^j(t) = R_i^j(t) + \alpha^j(t) + \nabla_{i1}(t) + \delta S_{i1\text{h}}^j(t); \\ \dot{S}_{i1\text{TM}}^j(t) = \dot{R}_1^j(t) + \dot{\alpha}^j(t) + \delta \dot{S}_{i1\text{TM}}^j(t); \\ \dot{S}_{i1\text{TM}}^j(t) = \dot{R}_i^j(t) + \dot{\alpha}^j(t) + \dot{\nabla}_{i1}(t) + \delta \dot{S}_{i1\text{TM}}^j(t), \end{cases} \quad (1)$$

где $\Delta S_{i1\text{f}}^j(t)$, $S_{i1\text{f}}^j(t)$, $\dot{S}_{i1\text{f}}^j(t)$ - разности фазовых измерений псевдодальностей **i** - й КС и главной КС (ГКС), кодовые измерения псевдодальности и измерения псевдоскорости относительно **j** - го НКА КНС соответственно;

$R_i^j(t)$, $\dot{R}_i^j(t)$ - геометрическая дальность и радиальная скорость **j** - го НКА относительно **i** - й КС соответственно;

$\alpha^j(t)$, $\dot{\alpha}^j(t)$ - уходы шкал времени (ШВ) и частоты **j** - го НКА;

$\nabla_{i1}(t)$, $\dot{\nabla}_{i1}(t)$ - расхождения ШВ **i** - й КС и ГКС и скорость их изменения;

$\delta \Delta S_{i1\text{f}}^j(t)$, $\delta S_{i1\text{f}}^j(t)$ и $\delta \dot{S}_{i1\text{f}}^j(t)$ - остаточные погрешности.

Вектор оцениваемых сетью КС параметров составляют координаты и составляющие вектора скорости (СВС) НКА КНС, уходы ШВ НКА, текущее расхождение шкал времени **i** - х КС относительно ГКС и скорость их изменения.

В ходе исследований была проведена оценка точности эфемеридно-временного обеспечения НКА с помощью сети КС ШДН при использовании геометрического подхода к оценке информационных параметров, а также результирующей точности НО в аппаратуре потребителей (АП). При

оценке точности была использована структура из 12 КС, причем рассматривалось два варианта размещения с базовыми расстояниями до 1000 км и до 4000 км (варианты I и II соответственно).

В качестве исходных данных использовались реальные альманахи КНС NAVSTAR и ГЛОНАСС. Остаточные погрешности соответствующих измерений в сети КС принимались равными (1σ) 0,5 см, 0,5 м и 0,3 см/с.

Расчеты корреляционной матрицы погрешностей оценивания искомых параметров системы уравнений (1) выполнялись согласно выражению:

$$\mathbf{K}_{\bar{\Theta}} = [\mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{A}]^{-1}, \quad (2)$$

где \mathbf{W} - весовая блочно-диагональная матрица измерений сети КС, обратная корреляционной матрице погрешностей измерений;

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{B}_1 \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_2 & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{B}_2 \\ \vdots & & \ddots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{A}_j & \mathbf{B}_j \end{bmatrix},$$

\mathbf{A}_j - блок матрицы производных измерений КС по координатам, СВС j -го НКА, а также по параметрам ухода ШВ j -го НКА;

\mathbf{B}_j - блок матрицы производных измерений КС по параметрам расхождений ШВ i -х КС и ГКС;

$j = (1, 2, \dots, p(t))$ - номер НКА в обзоре сети КС.

Корреляционную матрицу погрешностей определения искомых параметров можно представить в блочном виде:

$$\mathbf{K}_{\bar{\Theta}} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{11} & \mathbf{K}_{12} \\ \mathbf{K}_{21} & \mathbf{K}_{22} \end{bmatrix},$$

где соответствующие блоки согласно выражению (2), правилу перемножения матриц и формулам обращения блочных матриц

$$\mathbf{k}_{ij} = \begin{cases} (\mathbf{A}_j^T \mathbf{W}_j \mathbf{A}_j)^{-1} + (\mathbf{A}_j^T \mathbf{W}_j \mathbf{A}_j)^{-1} \mathbf{A}_j^T \mathbf{W}_j \mathbf{B}_j \mathbf{K}_{22} \mathbf{B}_j^T \mathbf{W}_j \mathbf{A}_j (\mathbf{A}_j^T \mathbf{W}_j \mathbf{A}_j)^{-1}; \\ (\mathbf{A}_i^T \mathbf{W}_i \mathbf{A}_i)^{-1} \mathbf{A}_i^T \mathbf{W}_i \mathbf{B}_i \mathbf{K}_{22} \mathbf{B}_j^T \mathbf{W}_j \mathbf{A}_j (\mathbf{A}_j^T \mathbf{W}_j \mathbf{A}_j)^{-1} \text{ при } i \neq j, \end{cases} \quad (3)$$

- блоки корреляционной матрицы \mathbf{K}_{11} , характеризующие погрешности и взаимокорреляционные моменты оценок координат и СВС i -го и j -го НКА, параметров ухода ШВ i -го и j -го НКА и скорости их изменения; $i, j = (1, 2, \dots, p(t))$ - порядковый номер соответствующих НКА в обзоре сети;

$$K_{22} = \left[\sum_{j=1}^p \left\{ B_j^T W_j B_j - B_j^T W_j A_j (A_j^T W_j A_j)^{-1} A_j^T W_j B_j \right\} \right]^{-1} \quad (4)$$

- диагональный блок корреляционной матрицы K_Q , характеризующий погрешности оценки расхождений ШВ между i - й КС и ГКС;

$p(t)$ - общее число НКА в обзоре сети КС в текущий момент времени.

При оценке точности с использованием выражений (3) и (4) были получены результаты, представленные в табл.1.

Таблица 1 - СКО оценок координатно-временных параметров НКА

Вариант конфи- гурации сети КС	СКО оценки искомых параметров (1σ)					
	коорди- нат НКА, м	СВС НКА, м/с	ухода ШВ НКА, м	скорости ухода ШВ НКА, м/с	ухода ШВ КС, мм	скорости ухода ШВ КС, мм/с
I	1,0-24,0	0,61-10	7,5-22	4,2-14,8	8-27	4-14
II	0,1-1,3	0,04-1,3	0,6-2,7	0,4-1,3	1-5	1-2,9

Несмотря на то, что погрешности определения эфемерид и уходов ШВ НКА КНС сетью КС (вариант I) соизмеримы с погрешностями закладываемой в НКА эфемеридной информации, из-за сильной корреляции этих погрешностей формируемые потребителем дифференциальные поправки к псевдодальности и псевдоскорости обладают высокой точностью. Результаты оценки точности определения интегральных ДП представлены в табл.2.

Результирующие оценки погрешностей дифференциальной коррекции эфемеридных и частотно-временных погрешностей НКА КНС в АП, а также результирующие погрешности НО с учетом остаточных погрешностей АП представлены в табл.3.

Таблица 2 - Результаты оценки точности определения интегральных дифференциальных поправок в АП

Вариант конфигурации сети КС	СКО (1σ)	
	псевдодальностей, м	псевдоскоростей, см/с
I	0,15	0,5-1,3
II	0,14	0,07-0,1

**Таблица 3 - Результирующая точность навигационных определений
АП**

Вариант конфигурации сети КС	СКО (1 σ)	НО потребителя*
	координат, м	СВС, см/с
I	<u>1,3-2,1</u> 0,09-0,15	<u>0,7-1,2</u> 0,1-0,4
II	<u>1,3-2,0</u> 0,09-0,15	<u>0,7-1,1</u> 0,03-0,12

*- в числителе даны результирующие (с учетом погрешностей АП) оценки СКО погрешностей определения координат и СВС АП, а в знаменателе - вклад остаточных погрешностей измерений АП после дифференциальной коррекции.

При расчетах предполагалось, что СКО погрешностей учета воздействия ионосферы в псевдодальности АП не превысит 1,8 м, тропосферы - 0,3 м, а СКО флуктуационной составляющей измерений АП с учетом фильтрации не превысит 1,0 м. Таким образом, суммарные погрешности измерений псевдодальности в АП принимались равными 2,1 м, а СКО измерений псевдоскоростей в АП - 0,5 см/с.

Из полученных результатов (табл.2 и 3) следует, что реализация таких показателей точности с помощью сети КС ШДН позволит при малом числе КС удовлетворить современные требования потребителей на значительных территориях с одинаковым качеством. Рассмотренный геометрический подход реализации сети КС ШДН может быть рекомендован для построения дифференциальных подсистем КНС в малых и средних регионах Земной поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сборник трудов 2 - й Международной конференции "Планирование глобальной радионавигации". – С.- П., 1996. - 489 с.
2. Ashkenazi V., Chao C., Chen W. High precision wide area DGPS. - Proceedings of the 5 - th International Conference on Differential Satellite Navigational System. - St.Peterburg, Russia, 1996. - P. 33 - 38.